

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:
DISEÑO Y ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DE UN SILO DE FONDO
CÓNICO DE 100 m³ DE CAPACIDAD PARA LA INDUSTRIA ALIMENTICIA,
EN PLANCHA LISA DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM-A572 GR50

AUTORES:
ELMO EDUARDO CALERO PÉREZ
LUIS ENRIQUE GONZÁLEZ ROJAS

TUTOR:
WILLIAM GUSTAVO DÍAZ DÁVILA

Quito, mayo del 2021

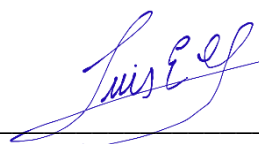
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES

Nosotros, Elmo Eduardo Calero Pérez con Cédula de Identidad N° 1719205658 y Luis Enrique González Rojas con Cédula de Identidad N° 0706787280, ponemos de manifiesto nuestra voluntad para que la Universidad Politécnica Salesiana obtenga la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **DISEÑO Y ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DE UN SILO DE FONDO CÓNICO DE 100 m³ DE CAPACIDAD PARA LA INDUSTRIA ALIMENTICIA, EN PLANCHA LISA DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM-A572 GR50**, mismo que ha sido desarrollado para la obtención del título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos ya mencionados.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra ya mencionada. En concordancia suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Elmo Eduardo Calero Pérez
C.I. 1719205658



Luis Enrique González Rojas
C.I. 0706787280

Quito, mayo de 2021

DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, DISEÑO Y ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DE UN SILO DE FONDO CÓNICO DE 100 m³ DE CAPACIDAD PARA LA INDUSTRIA ALIMENTICIA, EN PLANCHA LISA DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM-A572 GR50, realizado por Elmo Eduardo Calero Pérez y Luis Enrique González Rojas, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, mayo del 2021



William Gustavo Díaz Dávila
C.I. 0400926184

DEDICATORIA

Este trabajo, lo dedico a mis padres, Narzisa Pérez y a Elmo Calero, quienes me apoyaron a lo largo de mi vida, dándome el valor necesario para afrontar todas las adversidades. ¡¡¡Mamita y papito, lo logramos!!!... ¡¡Gracias por todo!!

A mis compañeros y sobre todo, a mi hermano Luis, gracias por darme el honor de ser tu amigo y juntos lograr cumplir nuestros sueños.

Y también, no puede faltar un agradecimiento a mi compañero de todas las noches de desvelo, a mi perro, mi amigo, mi Figo.

Elmo

Este documento, que resume el producto de esfuerzo y sacrificio de muchas personas en mi círculo, lo dedico a mis padres, Wilfrido y Sonia, quienes, además de apoyarme con los recursos necesarios, me impulsaron, emocionalmente, en cada desliz; a mis hermanas, Angie y Eliana, que representan todo mi amor incondicional.

A mi compañero Elmo, con quien formamos una amistad increíble y una competencia sana por cumplir nuestros sueños.

Y a mi mascota, Lucas, quien dejó de acompañarme a la luz de mi graduación, después de doce años de momentos increíbles.

Luis

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana, por habernos acogido durante estos años y haber puesto a nuestra disposición tan maravillosos docentes, quienes nos compartieron, tanto su sabiduría, como sus experiencias.

A nuestro tutor, el Ingeniero William Díaz, MSc. quien demostró total entrega como docente y representante de este proyecto. Sus enseñanzas las llevaremos a cada rincón de nuestra vida profesional.

Al Ingeniero Christian Juiña, MSc. con quien formamos un gran lazo de estudiante-docente y una amistad que esperamos perdure por toda la vida.

Elmo y Luis

DISEÑO Y ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DE UN SILO DE FONDO CÓNICO DE 100M³ DE CAPACIDAD PARA LA INDUSTRIA ALIMENTICIA, EN PLANCHA LISA DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM-A572 Gr50

DESIGN AND ANALYSIS THROUGH SIMULATION OF A 100 M³ CAPACITY SILO FOR FOOD INDUSTRY, IN ASTM-A572 GR50 SMOOTH STRUCTURAL STEEL SHEET PLATE

Luis González-Rojas¹, Elmo Calero-Pérez²

Resumen

La tendencia de aumento en el almacenamiento de alimentos, debido a la creciente población y los factores climáticos desfavorables en ciertas zonas, genera un problema de ingeniería en el área estructural, tratando de lograr los sistemas más estables y con el uso óptimo de material. El enfoque de esta investigación se extiende hacia el diseño de un silo de fondo cónico mediante normas como: EN 1991-4:2006, BPVC sección VII de ASME, API 650 y una posterior validación MEF a través del software ANSYS, donde se pueden observar presiones entre 39.09 y 66.76 kPa de acción sobre las paredes verticales y la tolva, respectivamente; lo cual resulta en la selección de planchas de 5mm en ASTM-A572 Gr50 con un factor de seguridad mínimo de 8.34, que indica un extremo conservadurismo por parte de las normas mencionadas, proveniente de la generalidad de los métodos que abarcan el diseño de silos y tanque; por su parte, la estructura de soporte arriostrada se trabaja con el método matricial de la rigidez y la selección por esbeltez, lo que permite la selección de perfiles con un F.S. de 1.46, garantizando un modelo funcional y económicamente óptimo.

Abstract

The increasing trending in food storage, due to the growing population and the unfavorable climatic factor in some areas, produces an engineering issue in the structural area, trying to reach the most stable system and with material optimization, the focus of this research extends to the design of a conical hopper silo using standards such as: EN 1991-4:2006, ASME-BPVC section VII, API 650 and a subsequent validation through ANSYS software where pressures between 39.09 and 66.76 kPa can be appreciated for the vertical wall and the hopper, respectively, which results in the selection of 5mm sheet plate in ASTM-A572 Gr50 with a minimum safety factor of 8.34, which means an extreme conservatism by the aforementioned standards, coming from the generality of the methods that cover the design of silos and tanks, otherwise, the braced support structure is worked with the matrix method of stiffness and slenderness selection, which allows the selection of profiles with a FS of 1.46, guaranteeing a functional and economically optimal model.

Palabras Clave: Silo, Eurocódigo, Simulación, MEF. **Keywords:** Silo, Eurocode, Simulation, FEM.

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador, ORCID: 0000-0001-6573-4353

² Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador, ORCID: 0000-0001-5595-5005

Autores para correspondencia: lgonzalezr1, ecalerop@est.ups.edu.ec

1. Introducción

El diseño estructural es un tema en desarrollo constante que se presenta de diferentes maneras en el crecimiento de las empresas. Particularmente, para la industria alimenticia, ha tomado un interesante enfoque hacia el almacenamiento de productos, a través de silos que puedan satisfacer las necesidades de conservación y futuro abastecimiento.

De acuerdo a las diferentes documentaciones presentadas en los reportes de la Unidad Nacional de Almacenamiento (UNA EP) [1], en Ecuador, los principales inventarios se manejan con productos como: maíz, soya, trigo, arroz, cebada; provenientes de grandes y pequeños productores; por lo cual, se priorizaría servicios de almacenamiento para estos productos.

Los silos han sido comúnmente utilizados en la agricultura a lo largo de los años [2]–[4], especialmente en los productos obtenidos en forma de grano y polvo [4]–[7], los cuales llegan a ser almacenados en depósitos de gran tonelaje, que requieren estructuras robustas para satisfacer la necesidad generada presentándose una tendencia a la reducción de costos, dando como resultado el uso de chapas y perfiles más delgados [8].

En Ecuador, se producen alimentos variados. Esta es una de las razones por lo que se concibe como un país muy rico; no obstante, existen provincias como Santa Elena, Bolívar, El Oro y Loja, donde las sequías se extienden por varios meses; y otras donde las fuentes hídricas son limitadas, como Manabí [9]; estas condiciones generan la necesidad de almacenamiento para abastecer durante estas temporadas.

Los problemas de los silos, en muchos casos, son producidos por un dimensionamiento incorrecto [10], por lo que se debe ser muy cauteloso en los detalles, tratando de realizar un diseño fácil y simplificado, buscando que los sistemas de carga y descarga sean centrales, con una estructura simétrica [11].

En los últimos años se han realizado diferentes investigaciones y contribuciones a la comunidad científica que permiten formar una base para la creación de un nuevo diseño de silos, así, Gallegos

[12] realizó el análisis de la estructura metálica de un silo para cemento, donde menciona que el diseño puede presentar fallas por pandeo en el lado más débil de la estructura y los arriostramientos ayudan en este caso. Todo esto se validó por el método de elementos finitos.

Por su parte, Marcinowski [13] estudió el efecto de la presión horizontal en los silos de acero, provocado por un cambio brusco en la temperatura ambiente, estableciendo que, para estos casos el Eurocódigo EN 1991-4 presenta una fórmula basada en la tensión planta y debería ser reemplazada por la fórmula presentada en su investigación, la cual se fundamenta en el caso de deformación plana; no obstante, se desconoce la validez de la ecuación en los casos experimentales hasta futuras investigaciones.

Un parámetro de consideración importante para el diseño es definido por Carson y Craig [14], quienes desarrollaron una investigación sobre los límites e inconsistencias de los diferentes códigos para la construcción de silos y tanques, referenciándose en los más comunes: BS EN 1991-4:2006; ACI 313-97; ANSI/ASAE EP433 DEC1988 (R2011) y AS 3774-1996. Los autores concluyen que, el Eurocódigo (EN 1991-4:2006) presenta un significativo avance sobre las otras normas, aunque no cubre todas las posibilidades.

Otra contribución al diseño de silos metálicos es realizada por Zeybek y Seçer [2], respecto a la viga anular que cubre a los silos elevados, donde menciona que, 4 soportes para la estructura del silo facilitan los sistemas de transporte; y, 8 soportes, reducen los esfuerzos generados sobre el sistema; sin embargo, un diseño de 4 soportes con vigas secundarias brinda los beneficios de los dos casos anteriores y para reducir la falta de uniformidad en las tensiones, se debe utilizar una viga anular muy rígida.

Jayachandran et al [15] investigaron acerca de los esfuerzos generados en los silos, aquí afirman que, en cada código de diseño se pueden calcular de forma analítica diferentes presiones; y, mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) se destacan detalles considerables, como el excesivo conservadurismo presentado por los códigos.

El objetivo fundamental de este trabajo es evaluar el comportamiento mecánico - estructural del silo y su estructura de soporte, diseñados para el almacenamiento de diferentes productos a granel, a partir de los parámetros establecidos en el Eurocódigo (EN 1991-4:2006), y todas las metodologías empleadas en la selección de elementos. Además, validar el diseño mediante el análisis MEF del software ANSYS.

2. Materiales y Métodos

2.1. Material

De acuerdo con el objetivo de este trabajo se planteó como material de diseño y estudio al acero estructural ASTM A572 Gr 50, las propiedades de dicho material se detallan en la Tabla 1; además, se indican también propiedades para el acero ASTM A36, empleado en los elementos de la estructura soporte.

Tabla 1. Propiedades de los aceros estructurales empleados [16].

Designación	Grado	Esfuerzo de fluencia		Esfuerzo de tensión		Elongación mínima, %	
		ksi	MPa	ksi	MPa	[200mm]	[50 mm]
ASTM A572	50	50	345	65	450	18	21
A36	-	36	250	58	400	20	23

2.2. Diseño propuesto

La geometría del diseño está basada netamente en las dimensiones necesarias para alcanzar los 100m³ establecidos como volumen y en las relaciones que se deben cumplir de acuerdo con el Eurocódigo, la geometría propuesta se indica en la Figura 1.

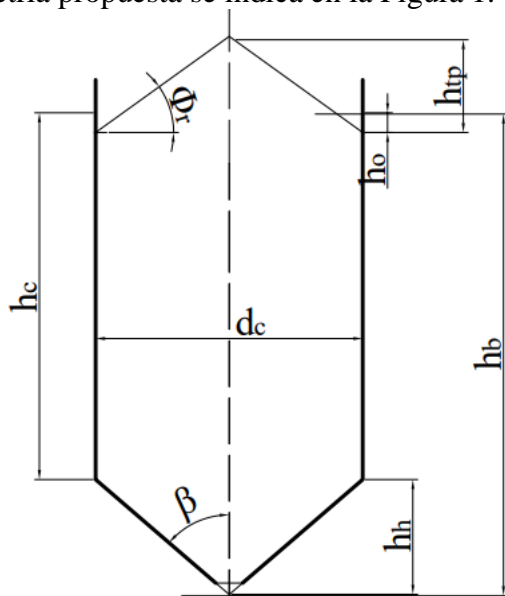


Figura 1. Dimensiones pertinentes para diseño y clasificación [17].

Las dimensiones utilizadas corresponden a: d_c diámetro del silo, h_c altura de la superficie equivalente, h_o punto más bajo en la pared que no está en contacto con el sólido almacenado, h_h altura de la tolva, h_b altura total del silo,

h_{tp} altura total de la pila superior, β ángulo de la inclinación de la tolva medido desde la vertical y Φ_r ángulo de reposo del sólido.

Para facilidad de comprensión en el diseño y las especificaciones, se fija un valor de 0 metros para h_o donde el nuevo dimensionamiento quedaría establecido en la Figura 2.

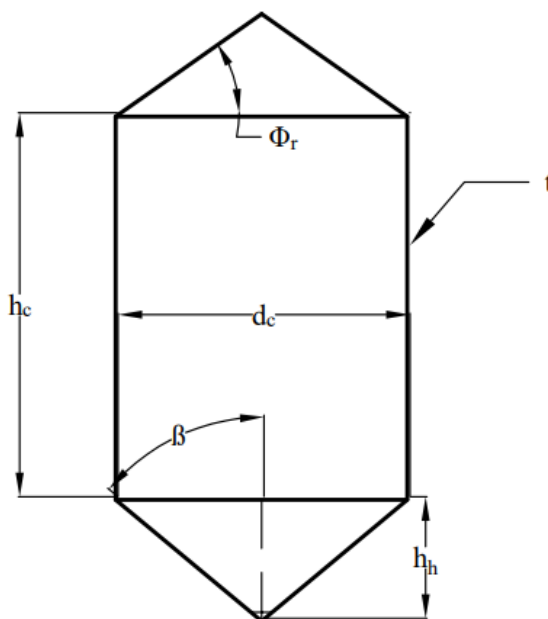


Figura 2. Resumen de dimensiones para el diseño.

En el silo de 100 m³, la carga máxima estará dada por un volumen nominal de 103,8 m³, y las densidades mostradas en la Tabla 2, donde se

indican todos los parámetros pertinentes para el diseño.

Tabla 2. Propiedades dinámicas de diferentes productos granulares[17]–[19].

	Densidad kg/m ³	Ángulo de reposo	Coefficiente de fricción
Maíz	820.00	35.00°	0.35
Arroz	750.00	25.00°	0.40
Soya	800.00	29.00°	0.21
Trigo	840.00	34.00°	0.44
Cebada	646.00	31.00°	0.37

La primera consideración está restringida por el EN 1991-4:2006 [17], clasificando el modelo como el caso 1 de tamaño y funcionamiento, debido al intervalo de carga $W_{1a} < W < W_{1b}$, siendo $W_{1a} = 10$ toneladas y $W_{1b} = 100$ toneladas. Además, se propone un modelo con esbeltez media, de acuerdo con la relación de altura y diámetro de la ecuación 1, que involucra el diámetro d_c y la altura h_c .

$$\frac{h_c}{d_c} \quad (1)$$

Para los productos considerados: maíz, arroz, soya, trigo y cebada, la configuración geométrica se mantiene, con los valores de la Tabla 3, a excepción del ángulo de reposo Φ_r , donde se revisarán los valores de la Tabla 2, según corresponda.

Tabla 3. Valores de las dimensiones del silo.

Variable	Valor
h_c	5.80 m
d_c	4.50 m
h_h	1.80 m
β	50.00°
Φ_r	Revisar tabla 2

2.2.1 Ángulo de inclinación de la tolva

La tolva necesita un ángulo que cumpla con una inclinación mínima para permitir el flujo del grano. Este se obtiene a partir de los valores que se observan en el diagrama de la Figura 3 y con

referencia al coeficiente de fricción, particularmente para el diseño propuesto, un ángulo de uso común en el país es de 50°, lo cual genera un flujo de embudo para el estudio de presiones.

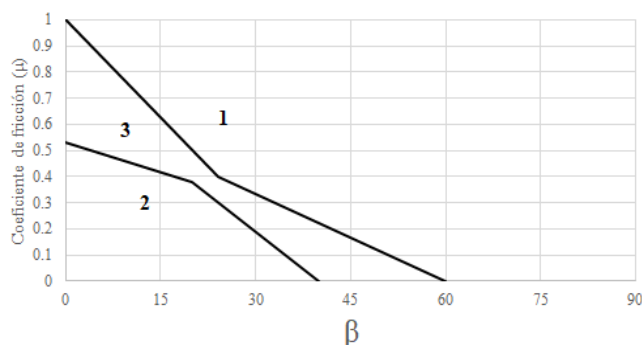


Figura 3. Diagrama para la selección del ángulo de inclinación de la tolva [17].

Donde la sección 1, corresponde a un flujo de embudo, el 2 a un flujo de masa y el 3, a la sección donde suceden los 2 flujos anteriores.

2.3. Diseño viga anular

De acuerdo a la propuesta de Zeybek y Seçer [2], el material óptimo para una viga anular debe ser rígido; y el seleccionado, considerando la disponibilidad en el mercado ecuatoriano, es el acero ASTM-A572 GR 50, mismo que se utiliza en todo el diseño.

Las dimensiones de los perfiles sugieren el uso de una viga UPN que será seleccionada de acuerdo con el esfuerzo máximo generado en esta. De acuerdo a Ramos [20], la selección del perfil depende de la comprobación al sometimiento de cargas concentradas intermedias (abolladura), a través de la ecuación 2, que se transmiten en los lugares donde no coinciden los apoyos del soporte como muestra la Figura 4.

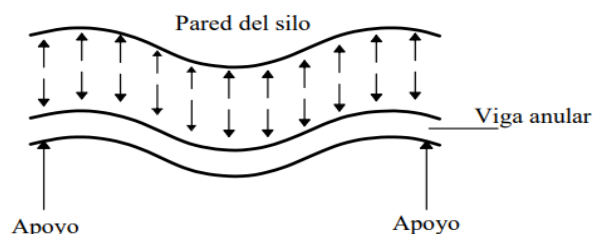


Figura 4. Cargas concentradas intermedias en la viga anular[21].

$$F_{b,Rd} = \frac{f_y \cdot t_w \cdot L_{ef}}{\gamma \cdot M_1} \quad (2)$$

Donde f_y es el límite elástico del material, t_w es el espesor del alma del perfil, L_{ef} es la longitud efectiva obtenida mediante la ecuación 3 y γ_{MI} es el coeficiente parcial de seguridad.

$$L_{ef} = x_F \cdot l_y \quad (3)$$

x_F es un factor de corrección obtenido mediante la ecuación 4, mientras que la longitud l_y se obtiene con la ecuación 5.

$$x_F = \frac{0.5}{\bar{\lambda}_F} \quad (4)$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right) \quad (5)$$

$\bar{\lambda}_F$, corresponde a un coeficiente obtenido mediante la ecuación 6, por otro lado, para la ecuación adyacente, s_s es la longitud de entrega de carga y t_f es el espesor del patín, para m_1 se establece la ecuación 7 y m_2 es 0 si $\bar{\lambda}_F \leq 0.5$ o se obtiene mediante la ecuación 8.

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot f_y \cdot t_w}{F_{cr}}} \quad (6)$$

$$m_1 = \frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} \cdot t_w} \quad (7)$$

$$m_2 = \frac{0.02 h_w}{t_f} \quad (8)$$

El factor F_{cr} se obtiene por medio de la ecuación 9 e involucra el límite elástico del material E , el ancho del alma y el alto del perfil “ d ”. Por otro lado, f_{yf} y f_{yw} corresponden a los límites elásticos del material del patín y el alma, respectivamente; mientras que, b_f es el ancho del patín y h_w es la altura del perfil sin considerar los patines.

$$F_{cr} = 0.9 K_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{d} \quad (9)$$

El último término por conocer para esta sección es el coeficiente K_F , para el caso de una carga equilibrada en cada apoyo está dado por la ecuación 10.

$$K_F = 6 + 2 \left(\frac{d}{a} \right)^2 \quad (10)$$

Donde d es la altura del perfil y a la separación entre rigidizadores.

2.4. Soporte

Según el decreto ejecutivo 1137 del año 2012, en el capítulo IV del uso y conservación de los caminos públicos, se establece en el artículo de autorización, entre otras cosas, que, para los vehículos que transporten bienes de carga indivisibles, las dimensiones se restringen como: 3,5 metros de ancho, 4,5 metros de alto y 23 metros de largo. Debido a estas restricciones y las dimensiones del silo, para el soporte, se proponen las medidas especificadas en la Figura 5.

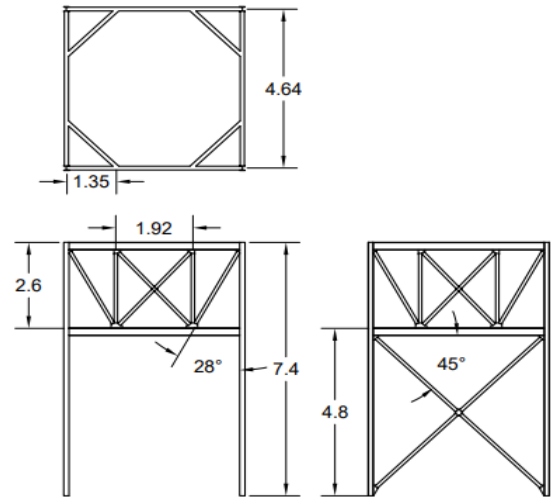


Figura 5. Dimensiones de la estructura.

El arriostramiento propuesto está basado en las posibilidades de carga y descarga para el silo, permitiendo el paso de camiones de cargas que se limiten a la normativa nacional. La Figura 6 muestra un plano arquitectónico que representa el eventual paso de vehículos de carga por debajo de la estructura soporte.

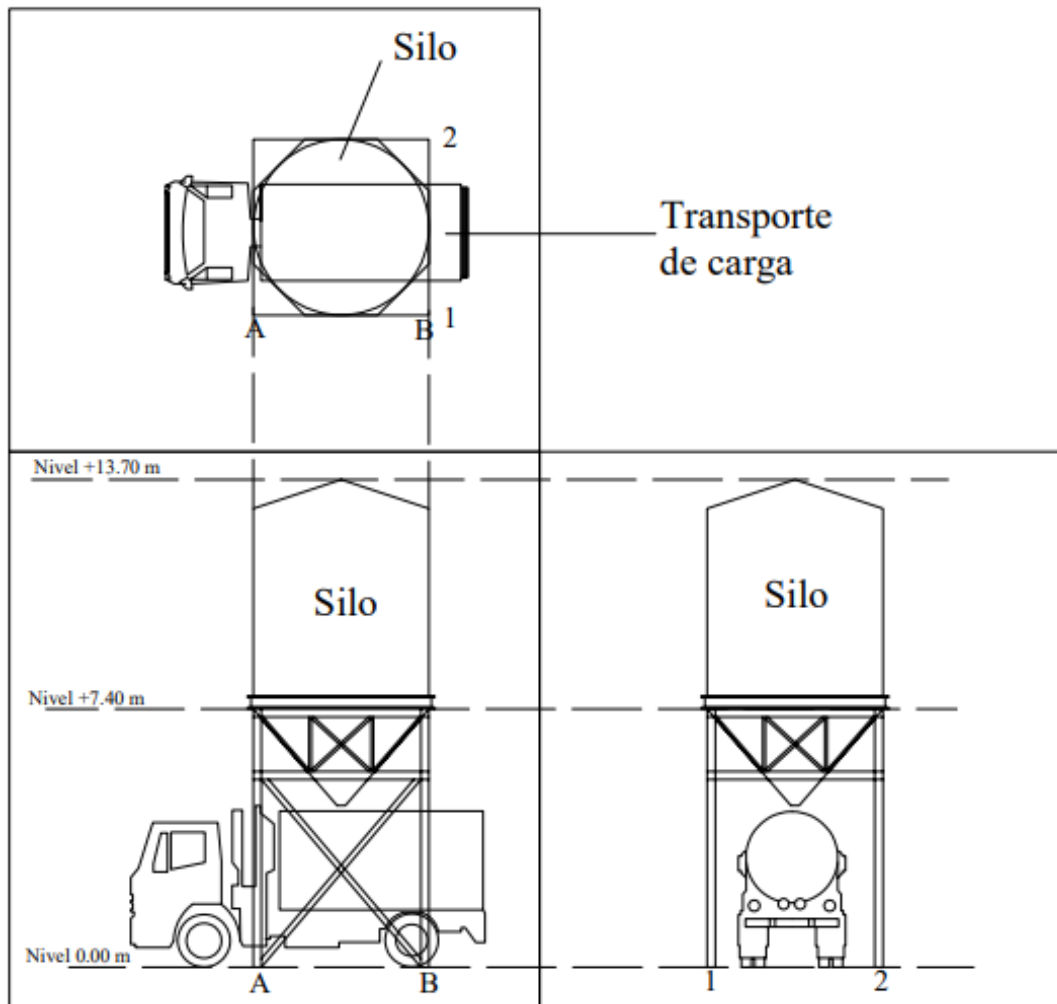


Figura 6. Vista arquitectónica del silo y su sistema de descarga.

2.5. Cargas en el silo

2.5.1. Cargas en las paredes del silo

Para la obtención del valor de presión vertical (P_{vf}), horizontal (P_{hf}) y la fricción de la pared (P_{wff}) debido al almacenamiento de partículas sólidas a gran profundidad (P_{ho}), que se observan en la Figura 7, es necesario recurrir al (EN1994 - 4 (2006)), utilizando las ecuaciones (11-16).

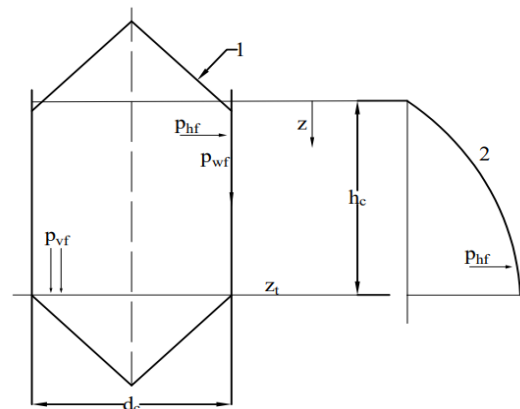


Figura 7. Presiones de llenado simétricas en el segmento de paredes verticales [17].

$$P_{hf}(z) = P_{ho} \cdot Y_j(z) \quad (11)$$

$$P_{wf}(z) = \mu \cdot P_{ho}(z) \quad (12)$$

$$P_{vf}(z) = \frac{P_{ho}}{K} \cdot Y_j(z) \quad (13)$$

Para determinar el valor de P_{ho} se tiene:

$$P_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o \quad (14)$$

$$z_o = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (15)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-z/z_o} \quad (16)$$

Dentro de los parámetros utilizados en las ecuaciones antes descritas, se tiene: γ como el valor característico del peso unitario, μ corresponde al valor característico de la fricción para el deslizamiento de un sólido en la pared vertical, K como la relación de presión lateral, z la profundidad por debajo de la superficie equivalente del sólido, A es el área de la sección transversal en la planta del silo y, finalmente, U como el perímetro interno de la sección transversal en planta del silo.

2.5.2. Cargas en la tolva del silo

Durante el diseño del fondo se deben considerar las cargas a las que la tolva será sometida, además de la función que cumplirá el silo. Para el diseño presentado, se utilizará un fondo de tolva poco profunda, con una relación de presión lateral K igual a 0.54, obtenido del nomograma para ángulos de tolvas presente en el Eurocódigo.

De acuerdo con la geometría del sistema propuesto para la tolva, se prevé el comportamiento representado en la Figura 8. Sección 2.

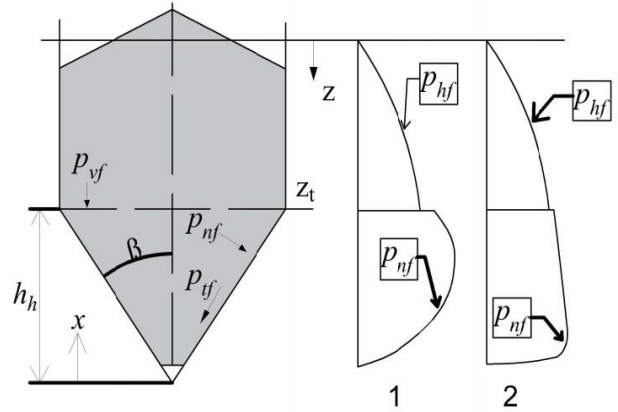


Figura 8. Distribución de cargas en tolvas empinadas y poco profundas [17].

Considerando lo expresado en la Figura 3, se tiene un flujo de embudo en el diseño de tolva propuesto, al tener un ángulo $\beta = 50^\circ$, es decir un ángulo de 40° con respecto a la horizontal. La presión normal que se producirá como se observa en la Figura 7 se la obtendrá mediante la ecuación 17.

$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \cdot \frac{x}{l_h} \quad (17)$$

Los factores que influyen en la ecuación 17 para el cálculo de la presión normal se detallan a continuación con las ecuaciones (18-21), respectivamente:

$$P_{vft} = C_b \cdot P_{vf} \quad (18)$$

$$P_{n1} = P_{vft} \cdot (C_b \cdot \sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \quad (19)$$

$$P_{n2} = P_{vft} \cdot C_b \cdot \sin^2 \beta \quad (20)$$

$$P_{n3} = 3.0 \cdot \frac{A}{U} \cdot \frac{\gamma \cdot K}{\sqrt{\mu \cdot h}} \cdot \cos^2 \beta \quad (21)$$

Al considerar un silo de clase 1, como se lo denomina según el Eurocódigo, el valor que tendrá el factor C_b será de 1,3; de manera similar, por tratarse de una tolva que producirá un flujo de embudo. Las cargas procedentes por el vaciado del silo, se las podrá obtener con las mismas ecuaciones de carga de llenado.

2.6. Espesor mínimo requerido

Después de obtener los valores de presión mediante el Eurocódigo EN1994 - 4 (2006), se debe encontrar el espesor mínimo de la chapa, para esto se utilizará el código y estándar internacional Sección VIII – Reglas para la construcción de recipientes a presión, División 1, de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME, por sus siglas en inglés), donde se muestran las ecuaciones 22 y 23, correspondientes al espesor mínimo para una pared sometida a esfuerzo normal y cortante, respectivamente.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6P} \quad (22)$$

$$t = \frac{P \cdot R}{2S \cdot E + 0.4P} \quad (23)$$

Dentro de las ecuaciones, se tienen los siguientes términos: t como el espesor mínimo requerido de la chapa, P la presión interna de diseño, R es la diferencia del radio exterior nominal menos el espesor de la pared, E como el factor de eficiencia de la junta, S el esfuerzo máximo permisible. La ecuación 22 se restringe a la condición $P < 0.385SE$, mientras que, la ecuación 23 lo hace con $P < 1.25SE$.

2.7. Cargas en el soporte

Las cargas presentadas en el soporte dependen de varios factores y se deben realizar algunas consideraciones, de acuerdo con el método de estudio; dichas consideraciones podrán ser confirmadas o descartadas una vez que el estudio computacional arroje los resultados pertinentes.

2.7.1. Cargas producidas por el peso del silo

Estas cargas provienen de la suma del peso del material almacenado y el material del silo; además de una carga viva adicional de 1 kN/m² de acuerdo a las áreas de almacenamiento sobre techos según la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC [22], considerando las acciones de llenado y elementos que garanticen la seguridad de los operarios.

2.7.2. Cargas de reacciones

Las reacciones se obtienen por el método de la rigidez para armaduras y a través de las matrices se obtiene el resultado de todas las fuerzas actuantes en la estructura de soporte.

2.7.3. Cargas sísmicas

El Eurocódigo presenta un estudio simple para las cargas sísmicas en el silo, no obstante, también sugiere el uso de normas establecidas por las autoridades de cada lugar, en este caso la NEC y el diseño sismo resistente [23], donde se basa netamente en el mapa para diseño sísmico y las ecuaciones 24 a y b, las cuales representan una fracción de la gravedad.

$$S_a = \eta \cdot Z \cdot F_a \rightarrow \text{para } 0 \leq T \leq T_c \quad (24a)$$

$$S_a = \eta \cdot Z \cdot F_a \cdot \left(\frac{T_c}{T} \right)^r \rightarrow \text{para } T > T_c \quad (24b)$$

Para las cuales, η representa la razón de relación espectral, r es el factor usado en el espectro de diseño elástico, T es el período fundamental de vibración, T_c es el período límite de vibración y Z la aceleración máxima esperada en la roca [23].

2.7.4. Cargas de viento

De manera similar, las cargas de viento provienen de la NEC [22] y se considera un factor de corrección de acuerdo con el grado de exposición del viento y una velocidad corregida del viento para una zona plana y desprotegida durante 10 minutos y a 10 metros sobre el suelo.

La velocidad corregida del viento v_b , se obtiene mediante la ecuación 25 e involucra la velocidad instantánea con un mínimo de 21 m/s o 75 km/h y un coeficiente de corrección σ para la altura que se categoriza de acuerdo con la obstrucción.

$$v_b = v \cdot \sigma \quad (25)$$

Posteriormente, se obtiene una presión de viento mediante la ecuación 26 que actúa sobre la superficie del silo.

$$P = \frac{1}{2} \rho_a \cdot v_b^2 \cdot c_e \cdot c_f \quad (26)$$

La NEC [24] dispone valores para el coeficiente c_e corresponde a la altura de 1.5 debido a la condición más desfavorable, al ser un silo prediseñado, por otro lado, el coeficiente c_f tiene un valor de + 0.7 en tanques de sección circular; ρ_a es la densidad del aire, con un valor general de 1.25 kg/m³.

También se debe considerar el momento de volteo que genera la carga de viento a partir de la ecuación 27. Este momento no debe ser mayor a un tercio de $W \times d_c$, al tratarse de un silo no anclado [22].

$$M_v = \frac{P \cdot D_{máx} \cdot H t^2}{2} \quad (27)$$

2.8. Teoría de fallas

Para comprobar los esfuerzos críticos que aparecen en un elemento al ser sometido, se aplicará el criterio correspondiente a un análisis de fallas estático, en este caso particular, y considerando el material dúctil supuesto para el modelo, se usa la Energía de Distorsión y la tensión de von Mises, debido a que este es el modelo menos conservador y más real en un inciso general [25]. Las ecuaciones 28 y 29 representan los esfuerzos principales de la teoría.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_A^2 - \sigma_A \cdot \sigma_B + \sigma_B^2} \quad (28)$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (29)$$

2.9. Modelo computacional

El análisis computacional está restringido a la resolución de modelos con el método de elementos finitos y para esto se debe estimar diseños preliminares que cumplan con los requerimientos teóricos previos y puedan ser analizados por el software, tal como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 9.

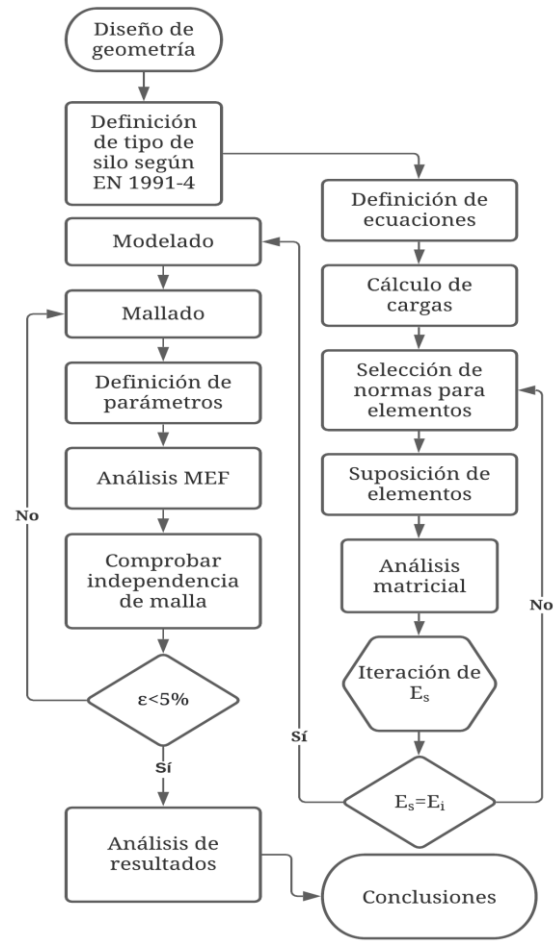


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de análisis

En este proceso, E_s corresponde al elemento supuesto para un análisis iterativo mediante el método matricial de la rigidez, y E_i al elemento que resulta de este análisis; por su parte, la independencia de malla hace referencia a la variación de resultados entre las simulaciones de un mallado y otro, con un error ε menor al 5 %.

3. Resultados y Discusión

3.1. Silo

El primer resultado para la selección de la chapa muestra las presiones que actúan en el silo, de acuerdo con la Tabla 5, y se ingresan en las ecuaciones del método de construcción de recipientes a presión de ASME, para obtener un espesor estimado inicial.

Tabla 4. Presiones dentro del silo.

Denominación de presión	Presión (kPa)
Horizontal almacenado	39.09
Horizontal llenado	19.05
Rozamiento llenado	4.57
Vertical almacenado	35.28
Descarga	Idénticas a las del llenado
Concentradas	-
Presión normal en la tolva	66.76

Los valores calculados muestran valores relativamente pequeños para las presiones del silo. Estas son ajenas a las propias del peso y actúan como estimaciones a los efectos dinámicos en el silo, resultando en un espesor de silo de 0.22 mm para la pared vertical y 0.62 mm para la tolva, no obstante, al obtenerse valores pequeños debido a las cargas, la Norma API 650 estima utilizar la relación altura y diámetro, para establecer un espesor de chapa de 5 mm en toda la superficie, incluida la cubierta, como se observa en la Figura 10.

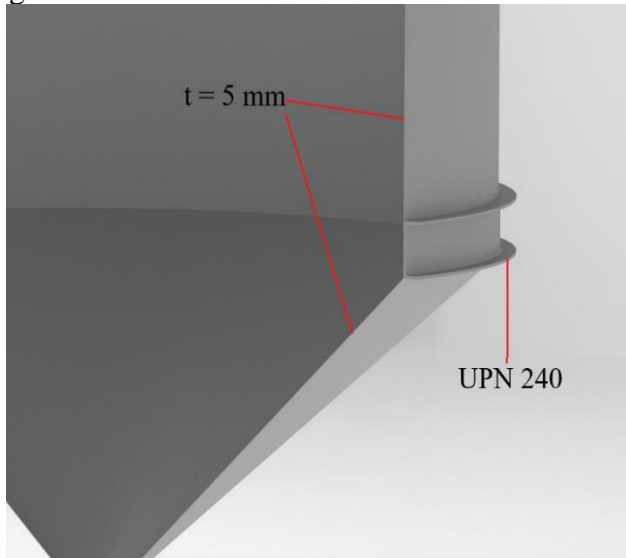


Figura 10. Espesor de silo y perfil de viga anular.

De manera similar, se observa la viga anular que sirve de transmisor de cargas hacia la estructura de soporte, dicha viga es un perfil UPN 240 conformado, que proviene del análisis de abolladura con un factor de seguridad de 1.18,

considerando que la norma sugiere el uso de valores mayores a 1.05.

A pesar de las condiciones conservadoras, en el caso de la viga anular, es importante resaltar la acción de cargas concentradas, que producen deformación a lo largo del tiempo, por lo que es necesario la ubicación de rigidizadores que aparecen en el método de cálculo con una separación no mayor a 100mm, tal como se muestra en la Figura 11, además, el espesor debe ser al menos el del alma de la columna.

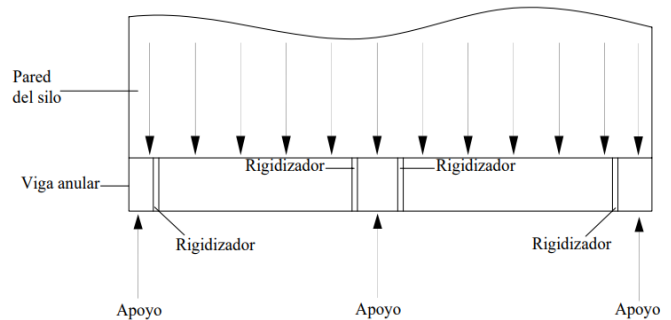


Figura 11. Diseño de rigidizadores.

Este modelo se somete a los primeros parámetros de simulación, colocando 8 apoyos, como se observa en la Figura 12, utilizando un área de apoyo y no un punto fijo para asemejar el sistema a la distribución real de carga.

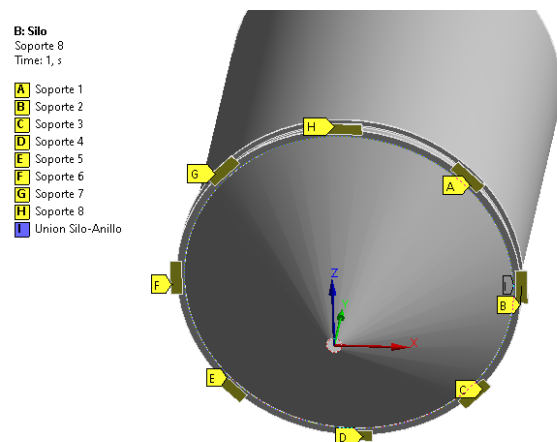


Figura 12. Apoyos del silo.

Para un análisis estático, se obtienen los resultados de las Figuras 13a y 13b. La solución se basa en la deformación total del silo y el esfuerzo equivalente de von-Mises, parametrizando todos los datos que se obtuvieron en el cálculo previo.

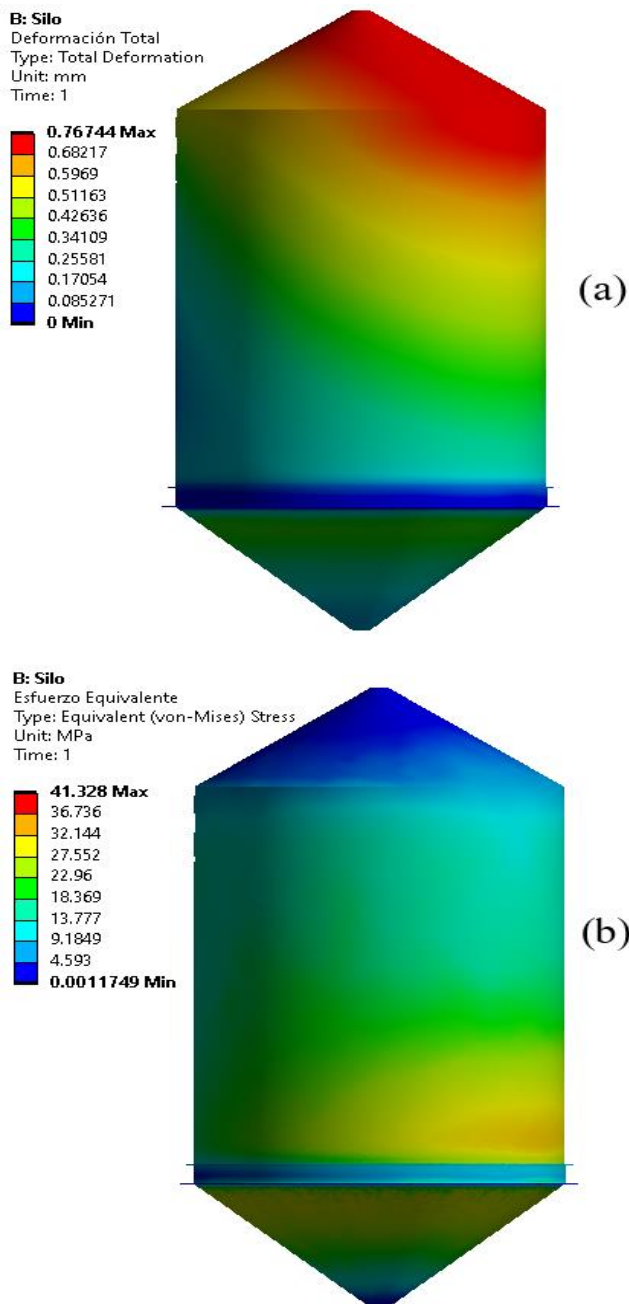


Figura 13. Simulación No.1 (Análisis estático del silo a) Deformación total, b) Esfuerzo equivalente)

El resultado muestra un valor de deformación máxima de 0.77 mm y esfuerzo equivalente de von-

Mises de 41.33 MPa que representa una cifra despreciable en un estudio real y prescinde de otro análisis que permita esclarecer cómo influye la norma en el análisis, así se obtiene el factor de seguridad de 8.34 que se muestra en la Figura 14.

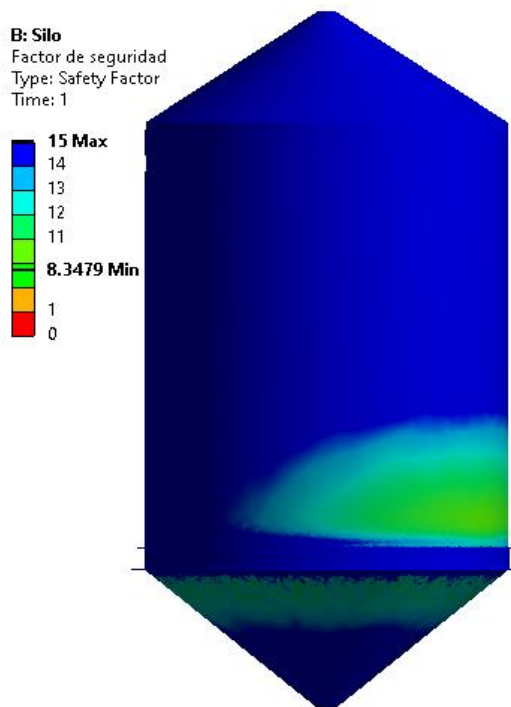


Figura 14. Simulación No.2 (Análisis estático del silo - Factor de seguridad).

El factor crítico corresponde a la sección de la tolva; mientras que, para el resto de elementos del silo se evidencia un modelo bastante conservador respecto a las especificaciones de la norma utilizada; no obstante, es importante recalcar que dicha norma abarca también el diseño de cilindros para el almacenamiento de líquidos, donde las presiones llegan a ser mucho más altas; además, reducir la chapa a valores teóricamente reales como 1 mm, generaría problemas de esbeltez y apreciación estética.

El segundo análisis del silo está direccionado al punto de acción de la carga sísmica sobre la viga anular, generando un caso menos crítico, respecto a la deformación del silo, como se muestra en las Figuras 14 a y 14 b, complementando con el esfuerzo equivalente.

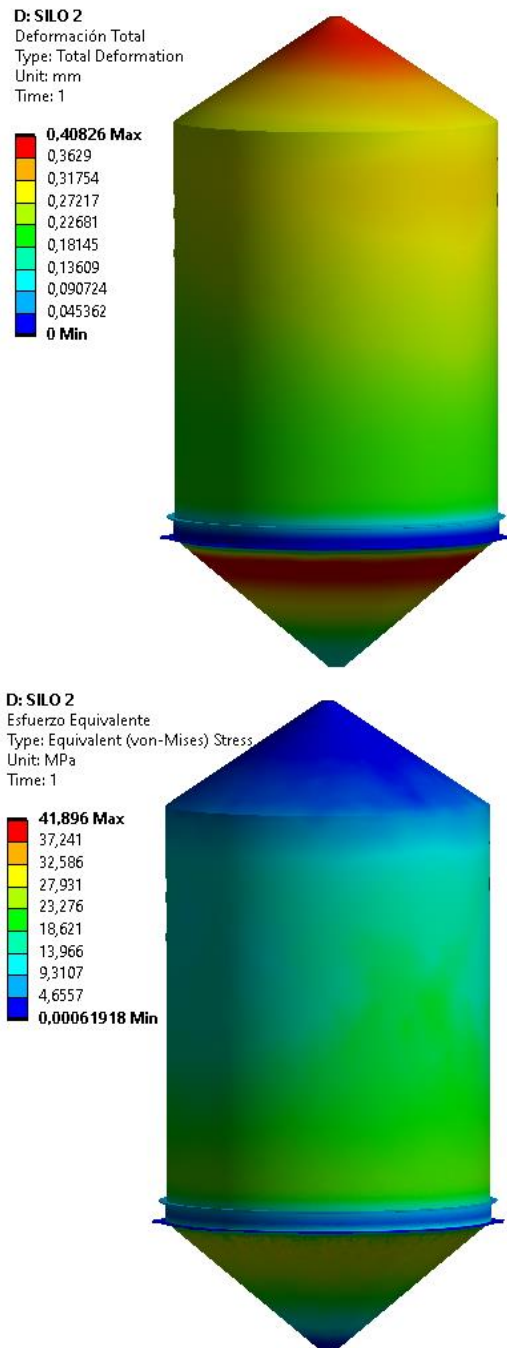


Figura 15. Simulación No.3 (Análisis estático del silo
a) Deformación total, b) Esfuerzo equivalente)

A pesar de mostrarse una ligera reducción en la deformación, el esfuerzo equivalente aumentó con una diferencia de 0.57 MPa, para un nuevo Factor de Seguridad que se muestra en la Figura 15.

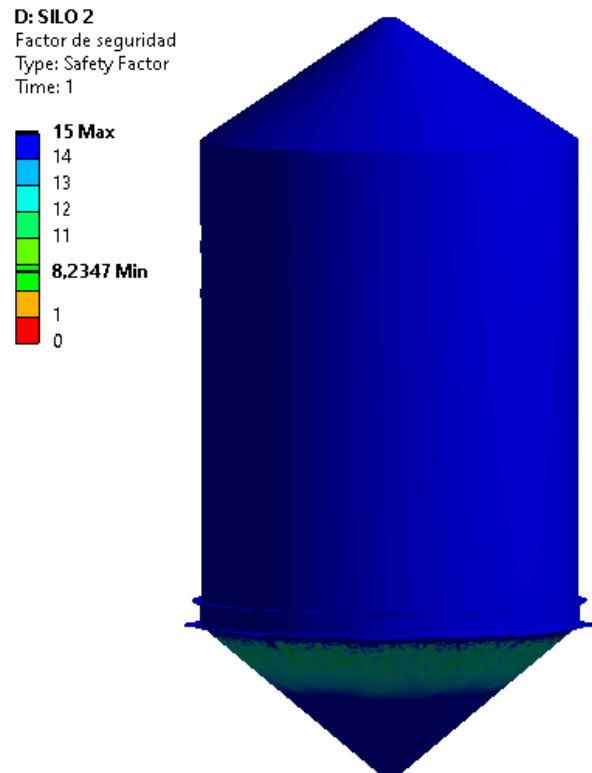


Figura 16. Simulación No.4 (Análisis estático del silo - Factor de seguridad).

3.2. Estructura Soporte

Por su parte, para la estructura de soporte, en la Figura 17 se muestra las fuerzas que actúan en cada uno de los elementos, posterior a la comparación de diferentes supuestos.

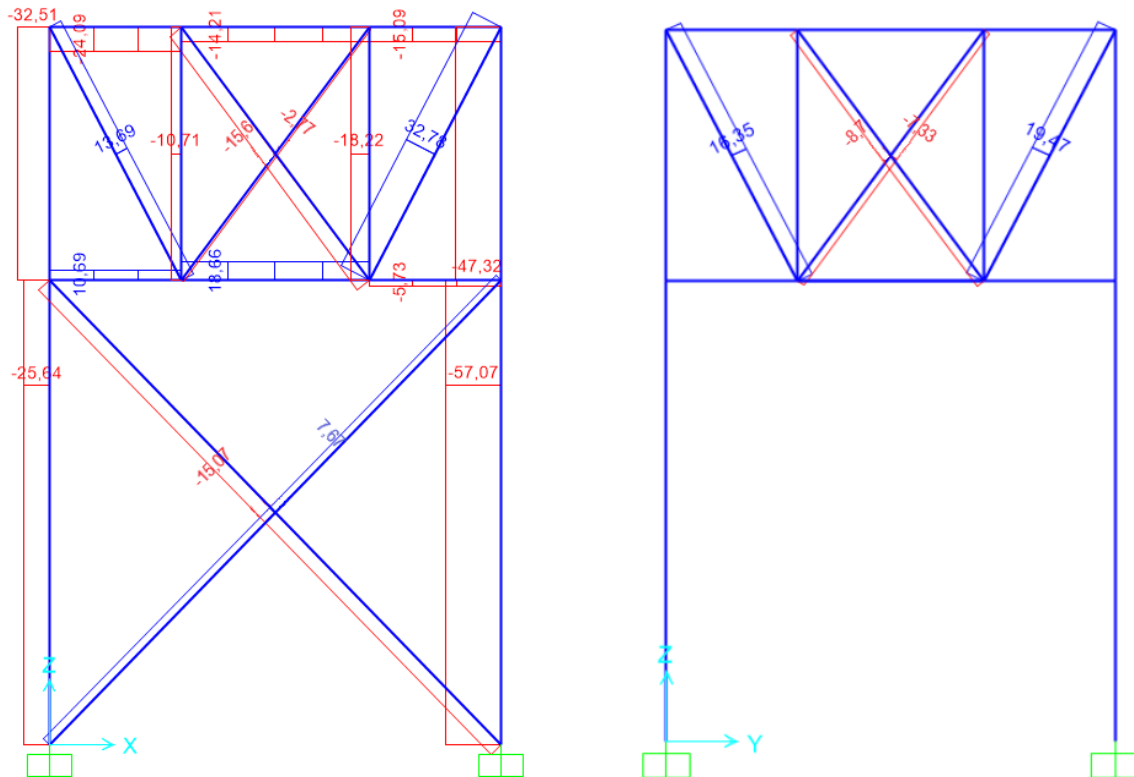


Figura 17. Fuerzas internas en la estructura.

Las secciones mostradas, contienen los datos de las mayores cargas existentes y las unidades en las que se indican las magnitudes son toneladas-fuerza. Las cargas críticas que actúan en cada elemento se muestran en la Tabla 5 y rigen la selección de elementos.

Tabla 5. Cargas en los elementos de la estructura.

Elemento	Carga (Ton)	Tipo de carga
Columna	57.07	Compresión
Viga	24.09	Compresión
Riostra superior	32.78	Tensión
Riostra inferior	15.07	Compresión

A partir de las cargas resultantes, se seleccionan los elementos mostrados en la Figura 18 y basado en la resistencia de los materiales por esbeltez, con valores menores a 140, y utilizando el método de viga-columna para los elementos del octógono que soportan a la viga anular.

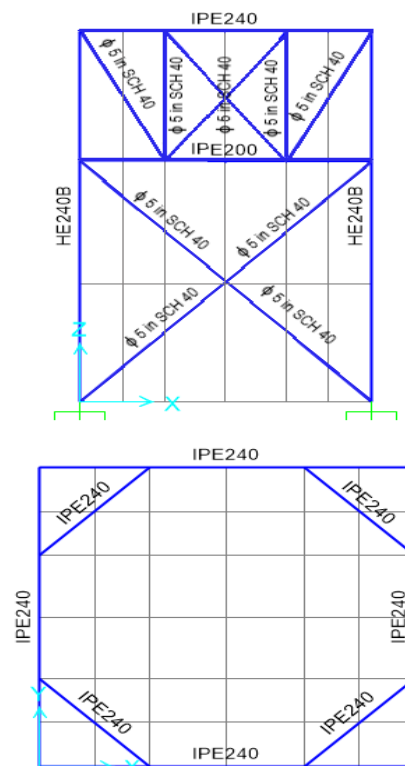


Figura 18. Elementos seleccionados.

Asimismo, se obtuvieron los datos y elementos necesarios para el anclaje, mostrados en la Figura 19, los mismos que garantizan la distribución de las cargas en los cimientos y complementan el modelo. Se calculó una placa de 38 x 38 cm por cada lado, con un espesor de 20 mm y 8 tornillos de ¾ in ASTM A193, Grado B7 con una resistencia mínima a la tracción de 862 MPa. Esta condición se presenta como un apoyo fijo o empotramiento en la simulación.

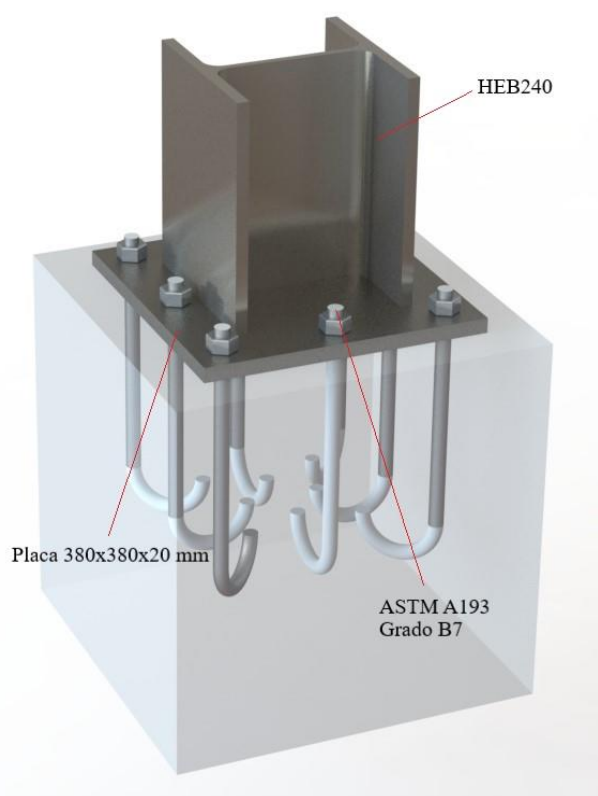


Figura 19. Placa y pernos de anclaje

Obtenidos los elementos del silo y de la estructura de soporte, la tercera simulación mostrada en la Figura 20, emula la condición de un análisis estático para la acción del peso del silo y el movimiento sísmico, con 884.73 y 175.53 kN, respectivamente para los casos más desfavorables.

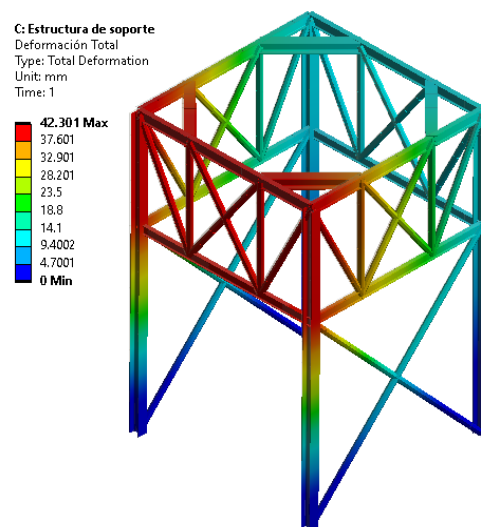


Figura 20. Simulación No. 3 (Análisis estático de la estructura – Deformación)

Los resultados muestran una deformación máxima de 42.30 mm, para lo cual es importante resaltar que, aunque el movimiento sísmico no proviene de un sistema estático, el estudio que dispone la NEC, permite tratarlo como tal. Sin embargo, empleando un análisis armónico en la cuarta simulación, con frecuencias entre 5 y 17 Hz, se obtienen los resultados de la Figura 21.

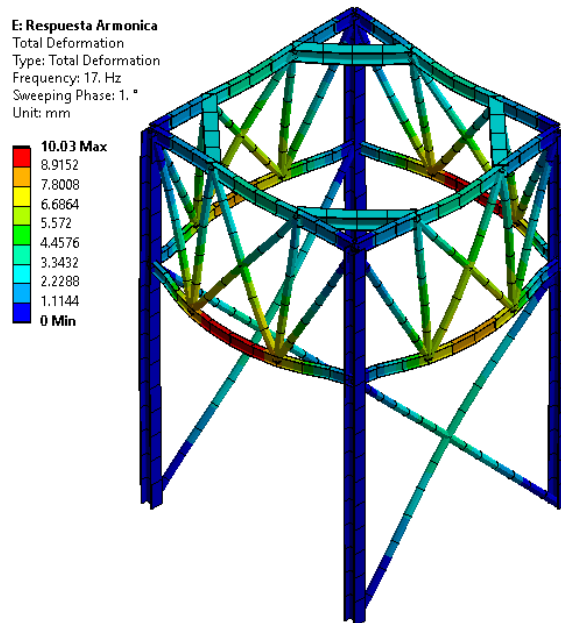


Figura 21. Simulación No. 4 (Análisis armónico con modos de vibración entre 5 y 17 Hz - Deformación).

Conforme a la frecuencia dada, se genera una deformación de 10.60 mm, lo cual no corresponde a una magnitud específica de sismo, ya que dicha frecuencia depende de factores asociados con el tipo de suelo, la distancia y profundidad del epicentro, entre otros; sin embargo, sí compete a valores críticos de vibración, como es el caso de los valores obtenidos por González [26] en 12 estaciones de análisis de espectro con frecuencias entre 5.55 y 12.5 Hz en promedio.

La quinta simulación presenta el factor de seguridad de la estructura soporte para el análisis estático mostrado en la Figura 22, donde actúan las cargas sísmicas en ambos ejes de coordenadas, paralelos al suelo.

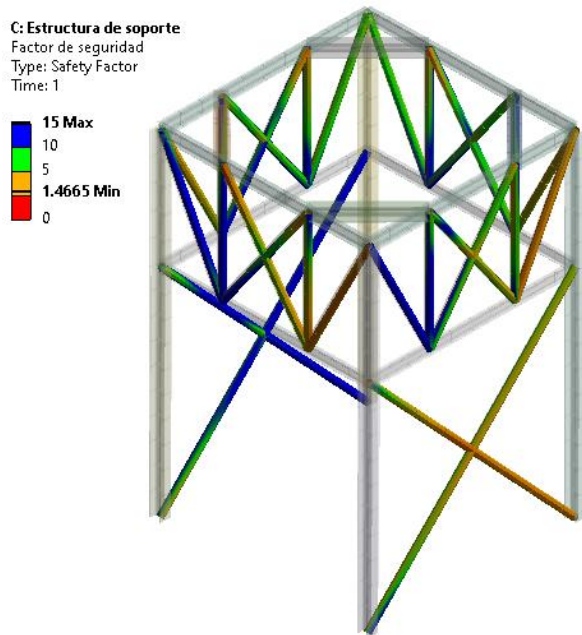


Figura 22. Simulación No.5 (Factor de seguridad en la estructura de soporte).

Correspondiente a la Teoría de la Energía de Distorsión y Tensión de von-Mises, se aprecia un valor de 1.46 para las riostras de la estructura que, bajo el criterio de los autores, es prudente en la medida que el sistema se dispone, ya que trabaja con un F.S. mucho mayor durante casi toda su vida útil y el límite mostrado se fundamenta en la actividad sísmica; no obstante, respecto al silo, existe un modelo conservador en demasía, que puede ser optimizado a partir de una norma que mantenga diferencia en el diseño de silos y tanques.

4. Conclusiones

El Eurocódigo, como procedimiento de cálculo, permite una fácil obtención de presiones, especialmente para silos de clase 1, como el que se ha estudiado; sin embargo, exhorta al uso de normas auxiliares, tanto para el diseño sísmico basado en la jurisdicción de cada país, como para la selección de elementos del silo.

El análisis matricial basado en la rigidez, utilizado en conjunto con la selección de elementos por esbeltez, es un método eficiente para obtener los perfiles de una estructura de soporte, ya que, de esta manera se obtuvo el modelo más real y menos conservador, con un factor de seguridad de 1.46 que garantiza validez y optimización de material.

A partir de los esfuerzos obtenidos y el factor de seguridad de 8.34, resultante en el modelo del silo, se observa que, tanto la Norma API 650 de ASME, como la comprobación al sometimiento de cargas concentradas intermedias, se catalogan como métodos con excesivo conservadurismo, ya que, aunque los procesos de producción y almacenamiento involucren la manipulación humana, un factor de seguridad tan alto, implica el uso de material innecesario en el sistema. Este sobredimensionamiento está directamente relacionado con el alcance de las normas, que deberían estar limitadas únicamente a silos o tanques.

El análisis estático realizado para el sismo, que implica los parámetros del suelo, ubicación geográfica, altura, entre otros, produce una carga de cortante basal, con un alto rango de tolerancia, respecto al análisis armónico, con una diferencia de deformación de la estructura de 31.7 mm o 299 %, entre ambos casos, estableciendo que, el cálculo dispuesto por la NEC, aumenta el grado de seguridad a los sismos presentados de forma común con frecuencias de onda sísmica entre 5 y 17 Hz.

Los elementos secundarios, denominados riostras, no actúan significativamente en el modelo estático que considera el silo; no obstante, al presentarse vibración y cargas sísmicas se convierten en los principales miembros de resistencia de la estructura, tal y como se aprecia en las Figuras 20, 21 y 22; Además, la configuración de riostras en forma de “X” es el sistema más

utilizado y recomendado por diseñadores estructurales al verificarse una esbeltez menor a 140, en este caso 139.

El ángulo de inclinación de la cubierta, mostrado en la Figura 2 y la Tabla 2, detallan la característica que corresponde a cargas producidas por nieve y granizo; sin embargo, en Ecuador, esta condición no es común, por lo que dicho ángulo puede ser mucho menor, e incluso podría utilizarse una cubierta recta para el área de llenado, siempre y cuando exista otro sistema de protección a eventuales cargas.

Referencias

- [1] Unidad Nacional de Almacenamiento, “Dirección Técnica de Comercialización de Productos y Servicios Agrícolas,” *Productos y servicios agrícolas*, 2018. .
- [2] Ö. Zeybek and M. Seçer, “A design approach for the ring girder in elevated steel silos,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 157, no. April, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.107002.
- [3] M. G. Fernández, Á. C. Yáñez, and P. V. López, “Análisis de la distribución de presiones estáticas en silos cilíndricos con tolva excéntrica mediante el MEF influencia de la excentricidad y comparación con el Eurocódigo 1.,” *Inf. la Construcción*, vol. 52, 2001.
- [4] Q. shuai Cao and Y. Zhao, “Structural system and buckling design of cellular steel silos,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 129, pp. 227–239, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.11.003.
- [5] O. Begambre and C. Quintero, “Modelo numérico de un silo metálica para almacenamiento de cemento: flujo, presiones, acciones y esfuerzos.,” *CILAMCE*, 2013.
- [6] A. Tascón, “Design of silos for dust explosions: Determination of vent area sizes and explosion pressures,” *Eng. Struct.*, vol. 134, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.12.016.
- [7] Y. Wang, Y. Lu, and J. Y. Ooi, “Finite element modelling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation,” *Powder Technol.*, vol. 257, pp. 181–190, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.02.051.
- [8] R. Antonowicz, C. Bywalski, and M. Kaminski, “Analysis of loads and structural capacity of steel silo with corrugated wall for pelleted material,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 20, no. 3, pp. 372–379, 2014, doi: 10.3846/13923730.2014.906497.
- [9] A. y P. Ministerio de Agricultura, Ganadería, *La Política Agropecuaria Ecuatoriana. Hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015-2025 II Parte*. 2016.
- [10] J. C. M. Lobato, F. P. Mascarenhas, A. L. A. Mesquita, and A. L. A. Mesquita, “Conical Hopper Design for Mass Flow – Case of Red Mud,” *Holos*, vol. 2, p. 120, 2016, doi: 10.15628/holos.2016.3662.
- [11] M. Wojcik, G. G. Enstad, and M. Jecmenica, “Numerical calculations of wall pressures and stresses in steel cylindrical silos with concentric and eccentric hoppers,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 247–258, 2003, doi: 10.1080/02726350307486.
- [12] J. Alejandro and G. De, “Análisis de estructura metálica de un silo metálico para cemento.,” *MEMORIAS DEL XXI Congr. Int. Anu. LA SOMIM*, 2015.
- [13] J. Marcinowski, “Effect on horizontal pressure in steel silos evoked by a sudden change in the ambient temperature,” *Heliyon*, vol. 5, no. 5, p. e01611, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01611.
- [14] J. Carson and D. Craig, “Silo design codes: Their limits and inconsistencies,” *Procedia Eng.*, vol. 102, pp. 647–656, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.157.
- [15] L. E. Jayachandran, B. Nitin, and P. S. Rao, “Simulation of the stress regime during

- grain filling in bamboo reinforced concrete silo,” *J. Stored Prod. Res.*, vol. 83, pp. 123–129, 2019, doi: 10.1016/j.jspr.2019.06.011.
- [16] ASTM, *Designation: A 572/A 572M-04*, vol. i. 2004, pp. 4–7.
 - [17] European Standard, *Eurocode 1 - Actions on structures - Part 4: Silos and tanks*, vol. 1. 2011.
 - [18] Food and Agricultura Organization of the United Nations, “Equivalencia de diversas unidades mundiales,” *ONU*, 1993. .
 - [19] J. E. Ospina, *Características Físico Mecánicas y Análisis de Calidad de Granos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2001.
 - [20] A. Ramos Gangas, “Diseño de la estructura en un silo de acero para almacenar 1000 toneladas de cemento,” p. 93, 2018.
 - [21] European Standard, *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 4-1: Silos*, vol. 1, no. 2009. 2007.
 - [22] Norma Ecuatoriana de Construcción, *Cargas (No Sísmicas)*. 2015.
 - [23] Norma Ecuatoriana de Construcción, *Diseño sismo resistente*. 2015.
 - [24] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley*, Décima. McGraw Hill, 2015.
 - [25] D. González, “Generación de espectros de respuesta con sismos chilenos para suelos en función de su período fundamental y nivel de amplificación,” Universidad de Chile, 2017.